第4章

Bluetooth通信の干渉と消費電力を低減する

干渉の種類に応じた対策の講じかた

David McCall

1990年代後半に開発されて以来，Bluetoothは相互接続性や消費電力，干渉など，多くの技術的課題に対応することを迫られてきました．しかし，最初に対応製品が発売されてから数年で，これらの課題について著しい進歩を遂げました．本稿では，AFH（adaptive frequency hopping），TDM（time division multiplexing），CQDDR（channel quality-driven data rate）などの干渉抑制のための基本的な技術を解説します．また，これらの機能および電力制御機能を搭載した英国CSR（Cambridge Silicon Radio）社のBluetoothチップを例に，その効果を紹介します．（筆者）

Bluetoothは，携帯電話やパソコン，PDAなどの民生機器間で音声やデータを転送するための短距離無線通信規格です．小型のバッテリ駆動機器における利用と短距離の無線通信という点から，Bluetoothデバイスでは消費電力がつねに課題となっていました．

Bluetoothは，2.4GHz～2.4835GHzのISM（Industrial, Scientific and Medical）バンドで動作します．この無線帯域は免許が不要なため，ワイヤレスLAN（IEEE 802.11b/g）注1や DECT（Digital Enhanced Cordless Telecommunications）注2コードレス電話など，多くの無線通信規格が使用しています．これらのデバイスどうしの距離が非常に近い場合，干渉が生じてBluetoothデバイスの通信品質が低下することがあります．

注1：本稿でワイヤレスLANと表記したとき，それは2.4GHz帯を利用するIEEE 802.11b/gを指すものとする．
注2：DECTは欧州のディジタル・コードレス電気通信標準．
注3：SCOリンクは，予約済みの帯域を使用して音声パケットなどをリアルタイム転送する場合に使用する．
注4：ACLリンクはデータ通信用の経路．利用できる帯域幅があれば，送信・再送信を行える．

1 干渉の種類によって対策もさまざま

Bluetoothの通信範囲は，電波の送信出力によって決定されます．Bluetoothの送信出力は，＋20dBm（クラス1），＋4dBm（クラス2），＋0dBm（クラス3）の三つのクラスに分けられます．クラス1のBluetoothデバイスは，伝送距離が最大100mに達します．クラス2のデバイスは伝送距離が最大10m，クラス3のデバイスは1m未満の短距離向けです．

Bluetoothのデータ転送速度は最大1Mbpsで，実際のスループットは723kbpsです．データは，Bluetoothのプロトコル・スタックによってパケットに分割されます．その後，SCO（synchronous connection oriented）リンク注3またはACL（asynchronous connectionless）リンク注4のいずれかで送信されます（図1）．

なお，Bluetooth対応機器は，ハードウェア，ファームウェア，ソフトウェアから構成されています．

● FHSSだけでは避けられない干渉問題

上述したように，Bluetoothで使用されるISMバンドは，ワイヤレスLANやZigBeeなど，多くの無線通信規格が採用しています．これらの無線通信規格との共存によって生じる干渉に加えて，Bluetoothデバイスは電子レンジなどの家電製品が原因で通信が途切れてしまうことがあります．このような家電製品は，その動作とともに電磁波を放射しますが，コストと技術的制約のためにこのエネルギーを特定のレベル以下に抑えることができません．

電波干渉についてBluetoothのおもな課題となっているのはワイヤレスLANです．BluetoothはISM帯域内で動作し，

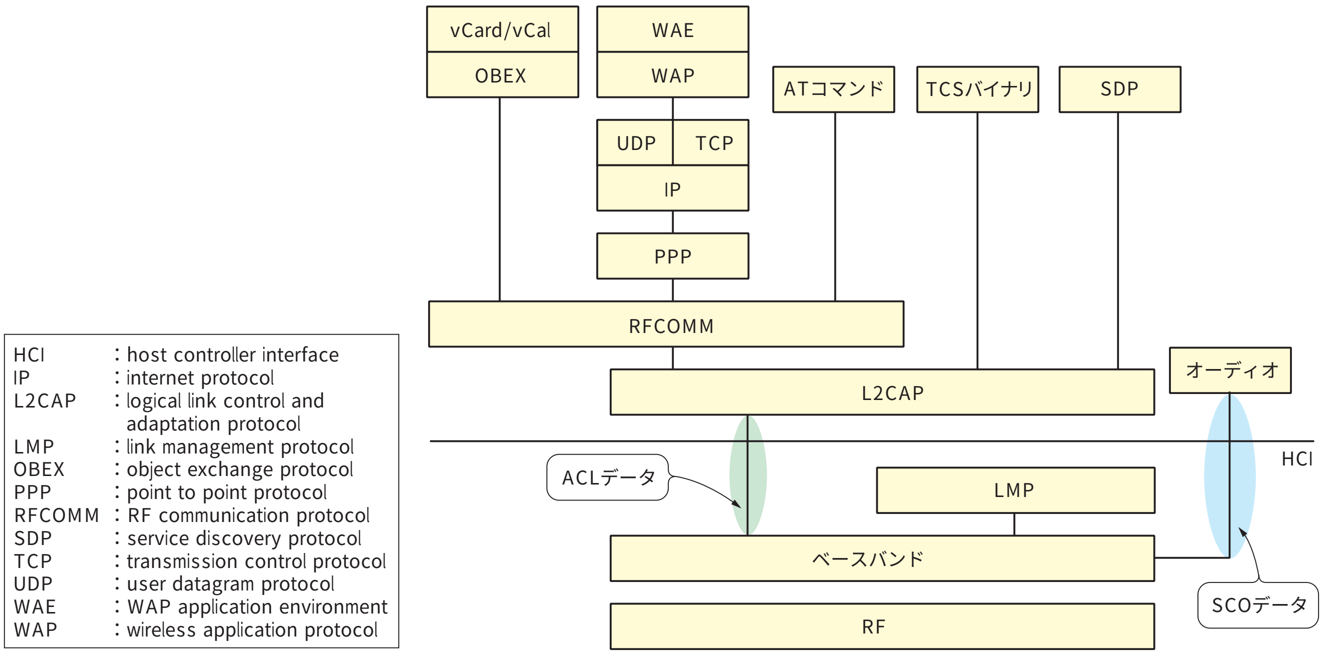


図1 Bluetoothプロトコル・スタック
図は，HCI，L2CAP，RFCOMM，SDPのほか，RF，ベースバンド，LMPを備えた典型的なBluetoothのプロトコル・スタックを示している．

パケット形式でデータを送信します．Bluetooth製品とワイヤレスLAN製品は，いずれも過去5年間で消費者に受け入れられ，普及してきました．両製品は物理的に近い位置に配置されることが多いため，共存問題が優先的に扱われ，干渉をなくすために多くのメカニズムが導入されました．

一定領域におけるISMバンドの電力量を制限するため，BluetoothとワイヤレスLANのいずれにも，データ伝送のスペクトラム拡散技術が必要不可欠となります．Bluetoothでは，1MHzの比較的狭い帯域幅でデータ・パケットを送信するFHSS（frequency hopping spread spectrum）を採用し，1秒間に1,600回という速さで79チャネル（1チャネル1MHz幅）をホッピングします．スペクトラム内で頻繁にホッピングすることによって，信号電力が帯域内で拡散します．

通常，干渉が発生した場合，パケットの受信はBluetoothとワイヤレスLAN信号の重複のために中断され，エラーとして記録されることがあります．とくに，アンテナが近い場所に設置されていると，実行中のすぐ隣のシステムに対してフロントエンドの過負荷干渉[注5]が生じる場合があります．しかし，この干渉が生じるには比較的強い干渉信号が必要なため，通常の干渉ほど頻繁に生じる問題ではありません．

● 使えないチャネルを特定してスキップするAFH

Bluetooth v1.2で必須機能とされたAFH（adaptive frequency hopping）は，通常の干渉を回避するために効果的な手段です．AFHは，ほかの無線デバイスがBluetooth信号に干渉を与えている，あるいはBluetooth信号が別のデバイスに干渉を与えている場合，「不良チャネル」を特定します．

AFH対応Bluetoothデバイスは，そのピコネット[注6]内でほかのデバイスと通信し，特定された「不良チャネル」の情報を共有します．各デバイスは「不良チャネル」の代わりに「良好チャネル」を使うように切り替えるため，使用される帯域幅に影響を与えません．AFHが動作するには，「不良チャネル」の分類が正確である必要があり，「通常の干渉」以外の形式の干渉があってはなりません．図2に，効果的に動作しているAFHを示します．

図2(b)に示すように，ワイヤレスLANが使用している帯域のチャネルを飛び越えて別のチャネルに移ること（チャネル・スキップ）で，ワイヤレスLAN信号の中断を最小限に抑えます（ただし，Bluetooth帯域幅を犠牲にする必要

注5：強い干渉信号によって受信部が過負荷状態になり，通信が遮げられる現象．
注6：一つのマスタと最大7個のスレーブで構成される一つのBluetoothネットワークをピコネットと呼ぶ．

があるが…)．ワイヤレスLANがその時点でアイドル状態であったとしても，優先度の高くないBluetooth転送はスループットが最大50％低減してしまうことがあります．この数値は高いように思われるかもしれませんが，ステレオ・オーディオ・ストリーミングなど，速度が重要なメディア・アプリケーションを実装した場合を除けば，ユーザは帯域幅が変化したことにほとんど気づきません．

● 過負荷干渉の対策にはTDMを用いる

TDM（time division multiplexing）は，AFHでは制御できないフロントエンドの過負荷タイプの干渉を防ぐために使用する方式の一つです．

この方式は，ワイヤレスLANの伝送をBluetooth干渉から保護するために導入されました．ワイヤレスLANがISMバンドで通信している（アクティブな）場合，優先度の高い

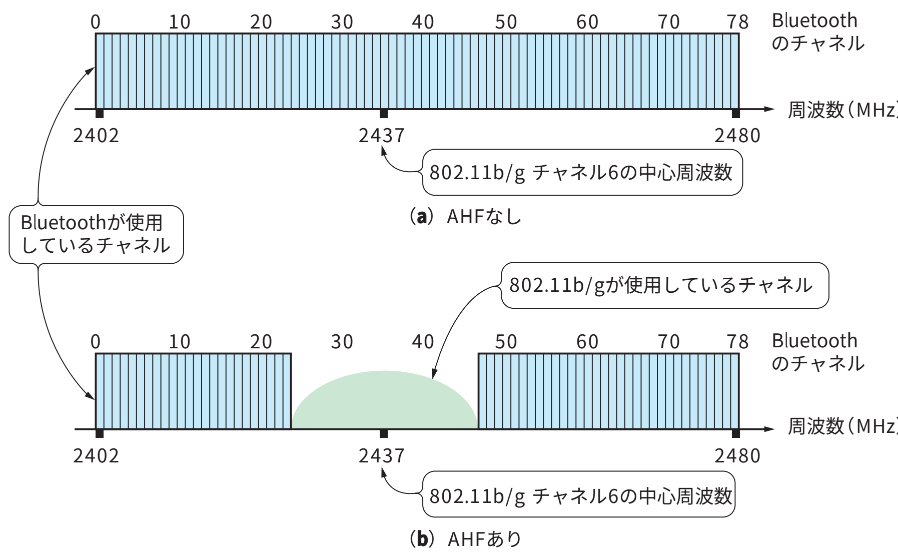
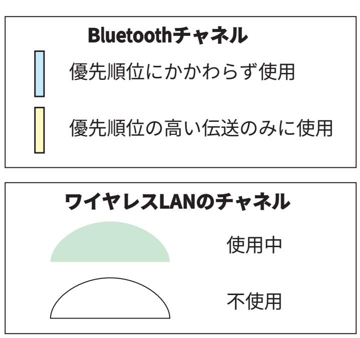


図2
AFH（adaptive frequency hopping）
図のように，AFHが機能すると，ワイヤレスLANで使用しているチャネル（不良チャネル）を飛び越えて，Bluetoothで使用する帯域内の別のチャネル（良好チャネル）に切り替わる．この機能を搭載した英国CSR社のBluetoothチップ「BlueCore」では，デフォルト設定として，新たに生じた干渉に約4秒（標準値）で対応する．



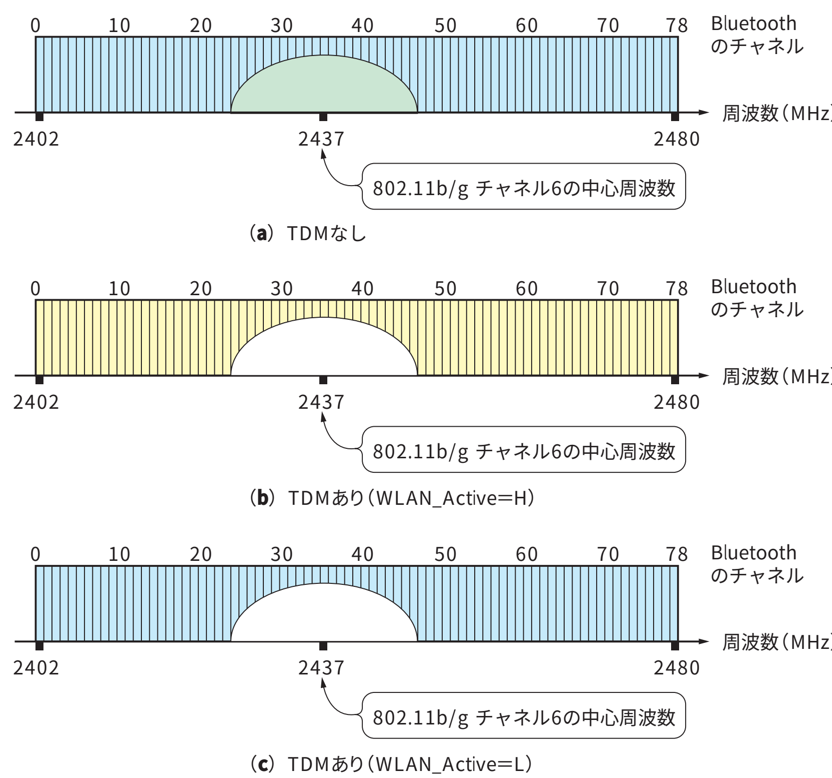


図3
TDM（time division multiplexing）
（a）のように，TDMがない場合，BluetoothとワイヤレスLANの間で干渉が発生する．そこで，WLAN_Active信号とBT_Priority信号によってワイヤレスLANとBluetoothの状態を伝え，（b）のように優先順位の高いBluetooth通信が生じたときにはWLAN_Active＝Hであっても，ワイヤレスLAN側の通信を停止させる．また，（c）のようにワイヤレスLANが通信していないとき（WLAN_Active＝L）には，全チャネルをBluetoothが使用する．

伝送を除き，すべてのBluetoothの伝送をシャットダウンするように機能します（図3）．

この方式は，チャネル・スキップと同じくBluetooth帯域幅の一部を犠牲にしますが，犠牲になる帯域幅の量はワイヤレスLANの負荷情況に比例します．したがって，ワイヤレスLANがアイドル状態の場合，通信維持のためのトラフィックによって生じる帯域幅の劣化は2%〜3%です．ユーザがこの程度の劣化に気づくことはありません．

TDMの効果を高めるには，ワイヤレスLANの無線通信に関する正確な情報が必要です．この点を考慮に入れて筆者ら（英国CSR社）は，無線がアクティブになったときにワイヤレスLAN信号が保護されるような信号（WLAN_Active）を定義しました．また，ワイヤレスLANの干渉からBluetooth信号の劣化を保護する必要がある場合，重要な（優先順位の高い）Bluetoothパケットが送受信されていることを示すオプションの信号（BT_Priority）も設けました．ワイヤレスLANの干渉は，ヘッドセットと電話機の接続を妨げることがあります．また，SCOのパケットの一部が欠落して，再送信されない場合，オーディオ品質が低下することがあります．BT_Priority信号は，HV3パケット（Bluetooth対応モノラル・ヘッドセットでもっとも一般的に使用されるストリーミング・オーディオの形式）のSCOデータを保護するために用います．

● 干渉の度合いに合わせてパケット形式を変えるCQDDR

CQDDR（channel quality-driven data rate）は，特定の干渉問題を対象としています．この技術は，周波数ホッピング，パケット・ヘッダやペイロードのエラー検査コード，パケットのアクノリッジまたは再送信機能に基づいて構築されています．

データ・パケットにはDHとDMの二つの形式が存在します．DHは高速のデータ転送，DMは中速のデータ転送として使用されます．DHパケットは，より多くのデータをパケット内に保持できますが，パケットの一部が破損している場合，データを回復するためにパケット全体を再送信する必要があります．DMパケットには，ペイロードの1/3を占めるFEC（forward error correction）注7コードが含まれています．つまり，10ビットのデータごとに，5ビットのFECコードが追加され，それぞれ15ビットのデータ＋FECコードのブロックで最大2ビットのエラーを訂正できます．このデータ・パケット形式は，最大データ転送

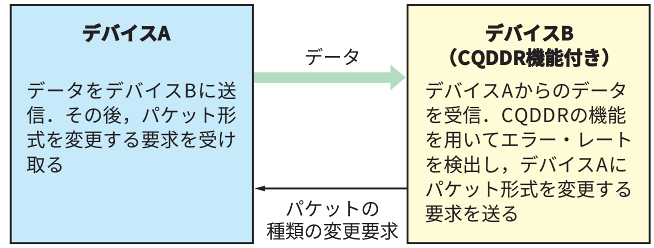


図4　CQDDR（channel quality-driven data rate）
CQDDRは，情況に応じてBluetoothデバイスが動的にパケット形式を切り替えるための機能である．

速度を低下させることがありますが，エラー訂正機能のないDHパケットよりも堅ろうです．この機能によって，受信デバイスは周辺の干渉に応じて使用するパケット形式を送信機に対して要求することができます．

例えば，あるデバイスが受信しているパケットに多数のエラーがあると判断される場合，そのデバイスはDMパケットによるデータの送信を送信機に指示します（図4）．その後，無線接続に干渉がなくなったときに，そのデバイスはDHパケットに戻ることを他方のデバイスに許可します．

なお，CQDDRはBluetooth仕様ではオプション機能であり，必須ではありません．したがって，CQDDRに対応していないBluetoothデバイスも存在します．そこで筆者らは，CQDDR対応デバイスがCQDDR非対応のデバイスにデータを送信する場合，NACK（受信失敗）とACK（受信成功）の比率によって無線通信の性能を推定し，送信するデータ・パケットのタイプを変更するアルゴリズムを開発し，Bluetoothチップ（BlueCore）に搭載しました．ただし，CQDDR非対応デバイスから情報を受信する場合に，データ・パケットが破損していると，本チップはこのような対策を実行することができません．

● 再送信によって干渉の影響を低減するeSCO

eSCO（extended SCO；拡張SCO）は，破損した音声データを再送信できるエラー検査付き音声チャネルです．

各パケットにはCRC（cyclic redundancy check）があるため，受信機はパケットが正しく受信されたことを確認できます．受信したパケットにエラーがある場合，またはパケットがすべて失われた場合は，アクノリッジが返されません．再送信期間では，アクノリッジの返されなかったパケットを再送信できます．

注7：エラーの訂正や検出を受信側のみで行うエラー制御方式．

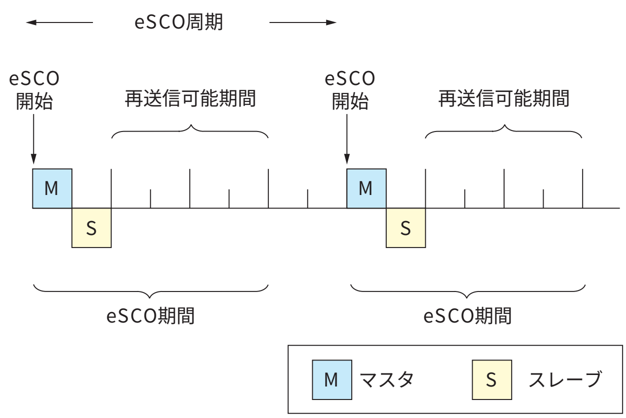


図5　eSCO（extended SCO）
eSCOには再送信間隔が存在し，その間にアクノリッジが返ってこなかったパケットをアクノリッジが来るまで再送信できる．eSCO開始の間隔は変更可能．

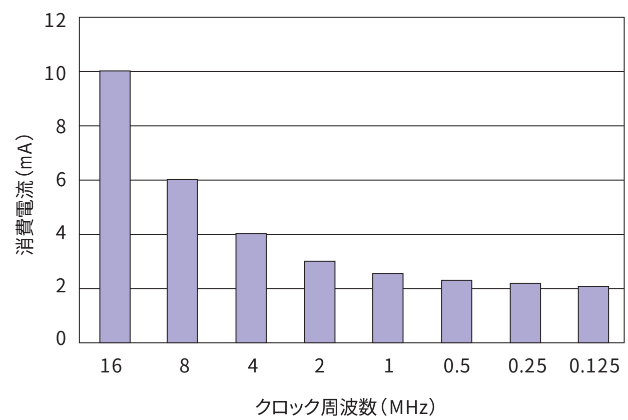


図6　浅いスリープによる低消費電力
浅いスリープ・モードに入ると，クロック周波数は10mAを消費する16MHzから2mAを消費する0.125MHzまで低下する．

Bluetooth v1.1のSCOでは，単一スロットのパケットのみが使用されました．eSCOでは，同期音声またはデータに対して3スロットのパケットを使用できます．つまり，Bluetooth v1.1では64kbpsの固定速度でしたが，Bluetooth v1.2で規定されたeSCOでは100kbpsを超える接続を確立できます．これは，単一スロットのパケットの場合に失われていたリンク容量と，周波数がホッピングするときのパケット間隔が使えるようになったことによって実現しました．

eSCOが開始されると，マスタはeSCOパケットを送信し，スレーブは通常のSCOのルールにのっとって応答します（スレーブはマスタのパケットを受信していない場合でも応答できる）．ここで，SCOとの違いがはっきりします．eSCOには再送信間隔が存在し，その間にアクノリッジが返ってこなかったパケットをアクノリッジが来るまで再送信できます（**図5**）．eSCO開始の間隔は変更可能です．Bluetooth v1.1のSCOでは，3種類のパケット間隔を選択できましたが，データ転送速度はすべて同じ64kbpsでした．eSCOでは，リンクの双方向でパケット長と間隔の両方を調整できるため，非同期通信が可能となります．

eSCOチャネルは干渉に対して積極的に対処したり，回避することはありませんが，破損したデータ・パケットの再送信によって，オーディオ品質は以前よりもほかの無線デバイスの干渉による影響を受けなくなります．

2　消費電力の重要性

消費電力は主要な問題であり，無線端末の開発競争においてはとくに重要です．短距離無線通信技術としてのBluetoothの消費電力は，非常に低く抑えることができます．実際，Bluetoothデバイスどうしの距離が50cm未満になることがあるパソコン周辺機器などの用途では，とくに消費電力が低減されます．

この低い消費電力が，バッテリ寿命を基準として消費者に評価される携帯電話やPDAなどの小型携帯デバイス向けの無線接続技術としてBluetoothが採用されている理由の一つです．

● スリープ機能とクロック制御による低消費電力化

Bluetoothのプロトコル・スタック内で，最大の電力消費はRF部の動作によるものです．ディジタル回路が10mAを消費するのに対して，送受信時のRF動作は50mAを使用します．したがって，BluetoothのRF部の動作を減らすことが，全体的な消費電力にもっとも影響を与えます．性能を低下させずに電力を節約する低消費電力モードを適切に実装すれば，さらに消費電力を減らすことができます．

筆者らが開発したBluetoothチップ（BlueCore）内にあるハードウェア・クロックは，RF部をOFFにして，チップを浅い，あるいは深いスリープ・モードにすることで，RF部とディジタル回路を隔離します（**図6**，**図7**）．

深いスリープ・モードに入るには，本チップでは20msの動作停止を必要とします．再びアクティブにするには，水晶発振器を安定的に発振させるために5ms，デバイス全体では約20msの起動時間を必要とします．本チップは，次に予定されている動作の前にデバイスをアクティブにす

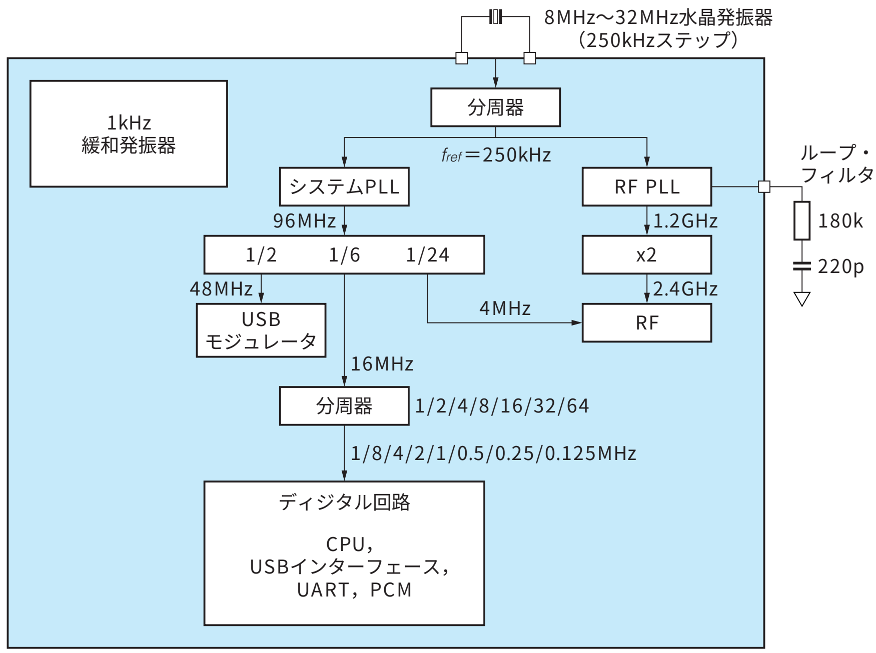


図7
システム・クロックの構成
深いスリープ・モードでは，1kHzの内蔵発振器を除いて，ほかのすべてのクロックがシャットダウンされる．

るスケジュール設定アラームを通じて深いスリープ・モードを解除するか，汎用I/O，UARTまたはUSBのシリアル・ポート送信器によって深いスリープ・モードを中断することができます．

干渉および電力消費のリスクを減らすためには，送信電力の制御方法も重要です．Bluetoothデバイスが，数cmしか離れていない別のデバイスと通信するときに，100m離れたデバイスと通信するために要する電力は必要ありません．本チップには，この識別機能が加えられています．無線通信を確立して維持するために必要な最低限の電流を使用することにより，消費電力を減らすことができます．

● チップ・アーキテクチャと新仕様による低消費電力化

本チップのアーキテクチャそのものが，電力効率と低消費電力を実現するために重要な役割を果たしています．図8に，本チップの典型的なブロック図を示します．本チップは，初めからシングルチップとして設計されており，消費電力を減らすために最小限の回路を集積しています．さらに重要な点は，ベースバンド回路について，従来のARMプロセッサではなく，ディジタル信号処理プロセッサ(DSP)を採用していることです．Bluetoothのような短距離通信とプロトコル・スタックの場合，通常動作時は複雑で消費電力の高いプロセッサは不要です．また，プロトコル・スタック処理の構造から，すべてのデータがマイクロプロセッサを経由する必要はありません．チップ・メモリ・ハブがメッセージ・パケットに含まれるデータを保存し，マイクロプロセッサはパケット・タイプと構造を整理します．次に，パケットはDSPによって送信されます．この方式では，個々のコンポーネントの使用が制限されるため，データ転送と処理のために消費される電力量が抑えられます．

「Bluetooth Core Specification Version 2.0＋EDR (enhanced data rate)」は，Bluetoothの最新仕様です．EDR対応Bluetoothではデータ転送速度が最大3倍向上し，データ・パケットは3倍速く転送されます．つまり，RF部がアクティブとなる時間が最小で1/3になります．データ転送の高速化によってデータ・パケットの間隔が広がったことで，その間にデバイスが浅いまたは深いスリープなどの低消費電力モードに入ることができます．EDR対応製品がEDRに対応していないBluetooth v1.1またはBluetooth v1.2デバイスと通信するには，標準のデータ転送速度を使用しなければならないため，現在はまだEDR Bluetoothとしての効果が制限されてしまっています．

David McCall
英国CSR社，Senior Product Consultant

4

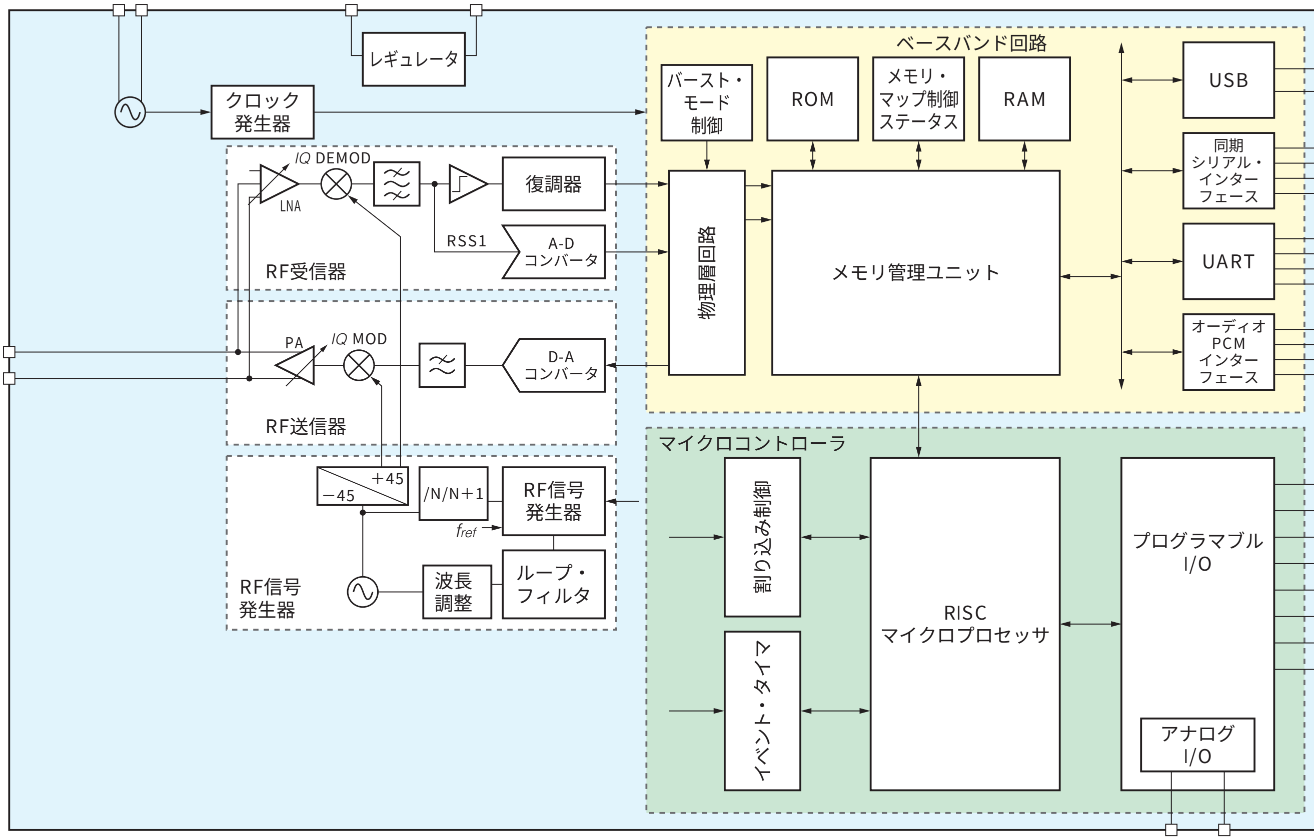


図8　BlueCore3-ROM CSPチップ

BlueCore3-ROM CSPチップでは，消費電力を減らすために最小限の回路を集積した．